DOI: 10.5846/stxb201712192274
陈芃,陈新军,陈长胜,胡飞飞.基于文献计量的全球海洋酸化研究状况分析.生态学报,2018,38(10):3368-3381.
Chen P,Chen X J,Chen C S,Hu F F.Bibliometric analysis of the global study on ocean acidification.Acta Ecologica Sinica,2018,38(10):3368-3381.

基于文献计量的全球海洋酸化研究状况分析

陈 芃[1,4],陈新军[1,2,3,4,5,*],陈长胜[1,6],胡飞飞[1]

1 上海海洋大学海洋科学学院,上海 201306
2 海洋渔业科学与食物产出过程功能实验室,青岛国家海洋科学技术实验室,青岛 266237
3 大洋渔业资源可持续开发教育部重点实验室,上海 201306
4 国家远洋渔业工程技术研究中心,上海 201306
5 农业部大洋渔业开发重点实验室,上海 201306
6 美国麻省大学达特茅斯分校海洋科学学院渔业海洋学部,新贝德福德 02744,美国

摘要:海洋酸化(Ocean acidification)为目前备受人们关注的全球性问题。因此为了能够客观地揭示海洋酸化的研究态势,研究采用文献计量分析(Bibliometric analysis)的方法,以海洋酸化概念提出后(2004 年以后)ISI Web of Science 期刊引文数据库中涉及到海洋酸化研究的所有文献为样本,对文献的增长趋势及期刊分布进行描述统计,并基于关键词的知识图谱及突变分析的方法探究海洋酸化的热点关注方向随时间的变动及研究前沿。描述统计表明:海洋酸化概念提出的这十多年来,涉及海洋酸化的研究文献数量呈现激增的态势,研究学科交叉明显,海洋酸化对珊瑚礁的影响是这十年来的重点研究领域。从基于关键词的知识图谱可以看到,在海洋酸化研究初期(2004—2009 年),研究内容主要分为两个部分,一是海洋酸化对海洋生物(尤其是珊瑚礁生物及浮游植物)及生态系统的影响;二是对海洋酸化现象的认识;中期(2010—2015 年),研究内容与初期相似,研究重点往海洋生物上倾斜,同时有新的热点研究区域和研究方向的出现;近期(2016 年以后),海洋酸化对海洋生物影响的研究依旧占据着主流研究方向。对基于突变分析得到的当前(2018 年 2 月)海洋酸化研究的热点关注的文献分析发现,当前海洋酸化的研究存在以下 5 个前沿方向:(1)在探究海洋酸化与生物的关系之时需结合多因子讨论;(2)探索生物在海洋酸化下的内在应对机制;(3)海洋酸化影响下的生物响应的综合评估及预测;(4)探索海洋酸化对海洋生态系统的影响;(5)对海洋酸化概念的挑战——海洋酸化形成原因的探索。

关键词:海洋酸化;气候变化;文献计量分析;共词分析;知识图谱

Bibliometric analysis of the global study on ocean acidification

CHEN Peng[1,4],CHEN Xinjun[1,2,3,4,5,*],CHEN Changsheng[1,6],HU Feifei[1]

1 *College of Marine Sciences of Shanghai Ocean University, Shanghai* 201306, *China*
2 *Laboratory for Marine Fisheries Science and Food Production Processes, Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao* 266237, *China*
3 *The Key Laboratory of Sustainable Exploitation of Oceanic Fisheries Resources, Shanghai Ocean University, Ministry of Education, Shanghai* 201306, *China*
4 *National Engineering Research Center for oceanic Fisheries, Shanghai Ocean University, Shanghai* 201306, *China*
5 *Key Laboratory of Oceanic Fisheries Exploration, Ministry of Agriculture, Shanghai* 201306, *China*
6 *Department of Fisheries Oceanography, School for Marine Science and Technology, University of Massachusetts Dartmouth, New Bedford* 02744, *USA*

Abstract: Ocean acidification is a well-known global issue. This study aimed to reveal the trends in research on ocean acidification. We used the method of bibliometric analysis to review the literature related to the study of ocean acidification

基金项目:海洋局公益性行业专项(20155014);上海市科技创新行动计划(14DZ1205000)
收稿日期:2017-12-19; **修订日期**:2018-03-24

*通讯作者 Corresponding author.E-mail: xjchen@shou.edu.cn

published after the concept of ocean acidification was put forward(i.e., after 2004) and indexed ISI Web of Science journal citation database. We first created descriptive statistics of the number of articles published annually and the journal frequency distribution. Then, the methods of keyword-based knowledge mapping and burst analysis were used to explore the hotspots of ocean acidification studies and the recent frontiers. Descriptive statistics suggested that the number of studies on ocean acidification has increased sharply in the past ten years and that studies related to this issue had an obvious characteristic of being interdisciplinary. In addition, the influence of ocean acidification on coral reefs was a major focus of these studies in the past ten years. The keyword-based knowledge mapping showed that major studies on ocean acidification mostly belonged to the field of biology: during the initial stage of ocean acidification studies(2004—2009), the research contents could be mainly divided into two parts; one is the influence of ocean acidification on marine organisms(especially coral reefs and marine phytoplankton) and ecosystems, and the other is the mechanisms of ocean acidification. During the midterm stage(2010—2015), the research contents were similar to those of the initial stage. However, the focus of research was mostly shifted to marine organisms. In addition, this stage showed the emergence of new research areas and directions. In the recent stage(after 2016), studies on the influence of ocean acidification on marine organisms still form the primary research direction. Results of the burst analysis of the most recent (February 2018) literature hotspots showed that the current research on ocean acidification has five study frontiers: (1) combining other factors with ocean acidification to explore its relationship with marine organisms; (2) exploring the internal response mechanisms of marine organisms when they stay in an acidic oceanic environment; (3) comprehensive assessment and prediction of biological responses under the effects of ocean acidification; (4) exploring the impacts of ocean acidification on the marine ecosystem; and (5) challenges to the concept of ocean acidification and exploring other causes of ocean acidification.

Key Words: ocean acidification; climate change; bibliometric analysis; key-word analysis; knowledge mapping

2003 年,海洋酸化(Ocean acidification)的概念由 Caldeira 等[1]提出,将其特指人类持续排放二氧化碳增加而导致海水 pH 降低的现象,他们以联合国政府间气候变化专门委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change,IPCC)提出的 IS92a 二氧化碳排放模式为依据,认为到了 2300 年左右全球表层海洋的 pH 将降低 0.77 个单位。这种海水酸化的现象可能会对海洋生物及生态系统造成严重的影响,因此,该概念的提出引起了学者们的广大兴趣,他们基于各自不同的专业角度对海洋酸化的现象、机制和影响展开了诸多研究。在该概念提出的十余年后的今天,对海洋酸化研究现状的梳理有助于从整体把握其研究现状,揭示其中存在的问题及研究前沿方向。国内外已有不少关于海洋酸化研究的综述文献出现:例如:2011 年,Gattuso 等[2]出版了专著《Ocean acidification》,该专著汇编了诸多学者之前对海洋酸化现象和机理的研究成果并重点阐述了海洋酸化对不同类型海洋生物的影响;唐启升等[3]综述了海洋酸化及其与海洋生物和生态系统的关系的相关研究;张成龙等[4]则专门阐述了海洋酸化对珊瑚礁生态系统的影响的相关成果。然而,文献综述虽然能够对一定时期内已有研究成果、存在问题进行分析、归纳、整理和评述,同时预测发展、研究的趋势[5],但是,这种方法通常基于归纳和总结已有研究的基础上,学者对文献的选择存在很强的主观性,研究成果较多的情况下难免存在遗漏。此外综述中未有一篇文献能够完全概括目前海洋酸化所涉及的学科内容:以 ISI Web of Science 期刊引文数据库为例,以"Ocean acidification"为主题词同时标题中包含"review"进行检索,共检索到的文献有 58 篇(截至 2017 年 7 月),对这些文献进行分析发现,几乎所有的综述都是总结海洋酸化对某一具体问题的研究结果,例如 Lemasson 等[6]总结了海洋酸化对牡蛎生物学影响的研究成果;Segman 等[7]则通过综合扇藻属(*Padina* sp.)的一些藻类的研究,揭示出海洋酸化对钙化藻类的影响。然而,海洋酸化所涉及的整体知识框架如何?研究热点随着时间的动态变化及前沿研究问题有哪些?

针对这些问题,研究采用文献计量分析(Bibliometric analysis)的方法,以海洋酸化概念提出后(2004 年以后)ISI Web of Science 期刊引文数据库中涉及到海洋酸化研究的所有文献为样本,对文献的增长趋势及期刊

分布进行描述统计,并基于关键词的知识图谱及突变分析的方法探究不同时期研究海洋酸化的热点关注方向。研究以期能够客观地揭示海洋酸化的研究态势,为学者整体把握其研究现状提供依据。

1 材料与方法

1.1 样本来源

研究的文献样本来源于 ISI Web of Science 期刊引文数据库中的 Web of Science 核心合集。以"Ocean acidification"为主题词进行文献检索,检索时间为海洋酸化概念提出后的 2004 年至 2018 年 2 月。提取结果中的论文题目、发表年份、作者、关键词和引用文献作为分析样本。

1.2 方法

1.2.1 描述统计

描述统计分为文献增长规律及期刊分布规律分析。文献增长规律即分年份统计涉及海洋酸化的文献数量,以期能够从整体把握学者对海洋酸化的关注趋势;期刊分布规律即分不同期刊统计研究海洋酸化涉及的文章数量,以期对海洋酸化所涉及到的学科有着初步的了解。

1.2.2 基于关键词的呈现知识图谱

知识图谱是以科学知识为研究对象,以一定的方法描述科学知识的发展进程与结构关系的一种图形[8],显示了知识与知识之间的联系[9]。以海洋酸化为例,科学家们对海洋酸化的研究侧重点不同,一些研究可能主要描述海洋酸化的现象,而另外一些文献则可能描述了海洋酸化对贝类、珊瑚礁的影响;同时在不同时期,学者可能关注的热点知识也不一样。因此研究利用共词分析(Co-word analysis)的方法以研究海洋酸化文献中的关键词为指标,画出不同时期研究海洋酸化的共现知识图谱,探究海洋酸化热点关注方向随时间变动的规律。基本原理和步骤阐述如下:

(1)基本原理

文章的关键词能够集中概括研究的内容。共词分析基本原理和假设为[10]:同时出现在一篇文献的一组(两个或两个以上)关键词在内容上存在着一定的联系;一组关键词在许多篇文献中的同时出现则表示这组关键词的关系密切。因此在知识图谱中,将关键词作为一个节点,这一组关键词所代表的"密切关系"就能通过节点间的连线进行连接,绘制这样许多组关键词的联系就形成了基于关键词的共现网络知识图谱。研究将时间划分为三个时期:海洋酸化提出初期(2004—2009 年)、中期(2010—2015 年)和近期(2016 年以后)。首先统计每一个时期发表的文献中关键词的出现次数,在去除涉及海洋酸化本身的关键词(如 ocean acidification 和 seawater acidification)并且合并意思明显相同的关键词(如 carbon dioxide 和 CO_2)后,以出现频次排名前 30 的关键词作为热点关键词进行分析。共现网络的绘制和优化分别利用 Kamada&Kawai 算法[11]和 Pathfinder 算法[12]实现。

(2)聚类分析和关键词中间中心度(Betweenness centrality)的计算

文献计量学中的聚类分析是以两两关键词同时出现的频率为基础,利用统计学的方法将复杂的关键词网状关系简化为几个相对较少的几个类群的过程[13],通过这种办法可以判断出一定时期内学者关注的几个重点。聚类分析具体方法见文献[14]。利用模块性 Q 值(modularity)判断聚类分析结果的好坏[14-15]:模块性取值为 0—1,最佳取值范围为 0.4—0.8,其值较低表示聚类界限不显著,其值过高则表示类群间联系过少。类群的具体意义借助关键词和关键词的中间中心度判断:中间中心度为具体的数值,一个关键词节点连接的其它关键词节点越多则中间中心度越高,中间中心度高的关键词可以在一定程度上反映出该类群研究的侧重点[16-17],中间中心度的计算方法见文献[16]。

1.2.3 突变检测

突变理论表明[18],一篇文章若在某段时间内被引频次激增,则表明该篇文献的内容可能为新的研究方向,即研究前沿。利用 Kleinberg[19]的突变检测算法对涉及海洋酸化的研究前沿进行探测,该算法利用了概率

自动机的原理,将一篇文章的被关注情况与其一段时间内的被引频次相关,即其被关注的开始及结束时间与被引频次发生显著增加及减少(突变)的状况有关,由此判断出该篇文献是否在一段时间内被学者们重点关注,并给出这段时间的起止年份及突变强度(burst strength),突变强度表示结果的可信度。取样本文献中的被引次数排名前 10%的参考文献进行计算,分析当前(2018 年 2 月)还处于热点关注的文献,由此确定目前海洋酸化研究的前沿领域。

1.3　分析软件

以上分析利用文献计量软件 Citespace 5.1.R6 进行[20]。

2　结果

2.1　描述统计结果

2.1.1　文献增长规律

截至 2018 年 2 月,关于海洋酸化的文献总计 5275 篇。总体上,涉及海洋酸化的研究文献数量呈现激增的态势(图 1):2004 的文献数量为 6 篇;2005—2008 年的 4 年,发表的文献数量就由十位数(17 篇,2005 年)达到百位数(105 篇,2008 年);2017 年的文献数量已达到 864 篇,为这几年中发表文章数量最高的年份;到了 2018 年,虽然研究统计的月份只到 2 月份,但是其数量已达到 119 篇。可见基于海洋酸化的研究是这十多年来科学界的热点话题。

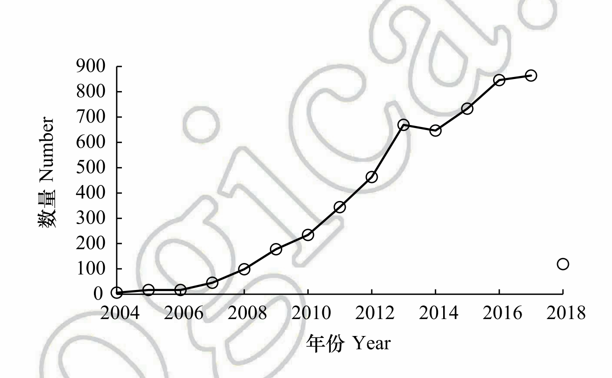


图 1　海洋酸化研究历年(2004 年至 2018 年 2 月)来发表的文献数量

Fig.1　Annual numbers (from 2004 to the February of 2018) **of literatures about the studies of ocean acidification**

2.1.2　期刊分布规律分析

表 1 统计了刊登海洋酸化的研究文献最多的前 20 种期刊,它们包含的文献数量占所有检索文献的 44.95%。根据对这 20 种期刊类型的分析,研究海洋酸化不仅包含了如海洋学(如《ICES Journal of Marine Science》和《Oceanography》)和生物学(如《Integrative and Comparative Biology》)这样的传统学科,而且涉及到许多学科交叉的内容,如生物地理学(如《Biogeosciences》)、海洋生物学(如《Marine Biology》)和地球物理学(如《Geophysical Research Letters》),这表明海洋酸化的研究需要多学科的共同参与;同时还可以发现,在这 20 种期刊中总共有 19 种期刊的影响因子在 2.0 以上,另外包含着诸如《Scientific Reports》和《Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America》这样的综合类期刊,此外,备受自然科学界关注的主流期刊《Science》以 50 的文献数排名第 23 位,这些都表明了,海洋酸化的研究受到了国外主流学术界的关注;此外,在这 20 种期刊中包含一种专门研究珊瑚礁的期刊——《Coral Reefs》,这在一定程度上表明了海洋酸化对珊瑚礁的影响是这十年来的重点研究领域。

2.2　基于关键词的共现知识图谱

图 2 为基于关键词的海洋酸化知识图谱的呈现,其中圆点为关键词节点,圆点的大小代表其中间中心度。通过聚类分析,可以将在海洋酸化研究初期(2004—2009 年)、中期(2010—2015 年)和近期(2016 年以后)的研究的热点关键词分别分成的 5 类、11 类和 11 类(图 2),模块性 Q 值分别为 0.4625,0.3144 和 0.663。表明对海洋酸化研究初期和近期的聚类效果良好,中期效果不佳。在知识图谱中,两个类群若存在一定的关系则它们中的关键词节点就会越靠近,导致两个类群存在重叠(如图 2a 中的类群 1 和类群 3);而中期(图 2b)的几个大的类群都有着重叠的情况出现,即为这个时期聚类效果不佳的原因。

表 1　刊登海洋酸化的研究文献最多的前 20 种期刊

Table 1　The top 20 journals of published literatures on the study of ocean acidification

期刊名称 Name of journal	文献数 Numbers of literature	影响因子(2016 年) Impacting factor(in 2016)
PLOS ONE	300	2.806
Biogeosciences	277	3.851
Marine Ecology Progress Series	197	2.292
Global Change Biology	156	8.502
Marine Biology	154	2.136
Journal of Experimental Marine Biology	143	1.937
Scientific Reports	125	4.259
Coral Reefs	117	2.906
ICES Journal of Marine Science	104	2.760
Marine Pollution Bulletin	101	3.146
Limnology and Oceanography	84	4.253
Geophysical Research Letters	81	2.382
Integrative and Comparative Biology	78	3.383
Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America	75	9.661
Nature Climate Change	71	19.304
Proceedings of the Royal Society of London B: Biological Sciences	67	4.940
Journal of Experimental Biology	62	3.220
Marine Environmental Research	62	3.320
Oceanography	59	2.176
Estuarine Coastal and Shelf Science	58	6.198

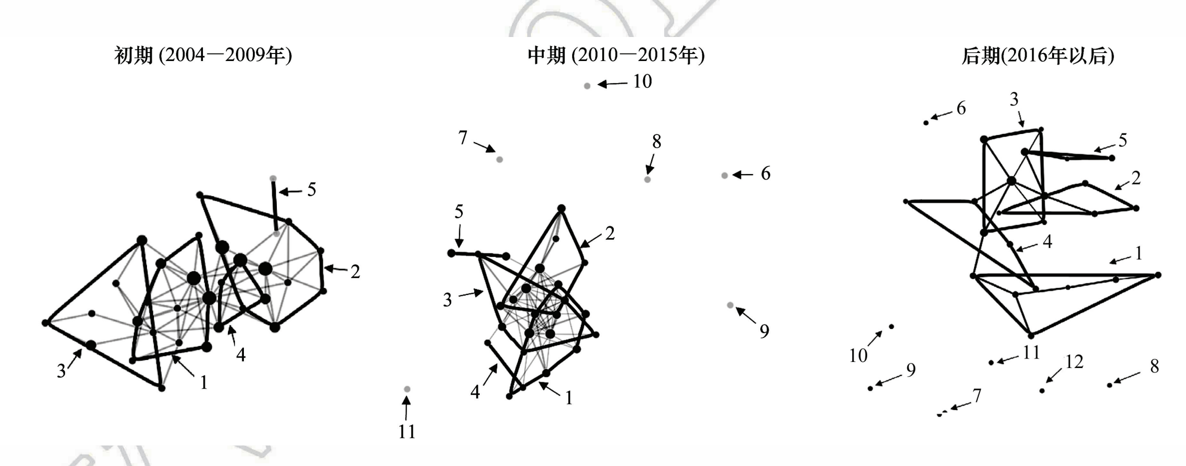


图 2　基于关键词的呈现知识图谱

Fig.2　Keywords based co-occurrence mapping knowledge domain

对初期类群中的关键词进行分析(表 2),类群 1 围绕着钙化一词,中间中心度最大(0.79),其次为气候变化(0.34),其中珊瑚礁相关的词汇最多,可见其表示着海洋酸化对珊瑚礁等生物影响的研究;类群 2 围绕着二氧化碳一词,中间中心度最大(0.32),同时包含着一些涉及海洋酸化的基础词汇(如海水、酸碱度和方解石等),表明该类群的关键词重点为对海洋酸化本身现象的认识;类群 3 围绕着赫氏颗石藻(*emiliania huxleyi*)一词,中间中心度最大(0.42),同时还包含着与类群 1 相似的关键词如钙化率,表明类群 3 与类群 1 相似,都是研究海洋酸化对海洋浮游生物的影响,这一点也可以从图 2a 中的类群 1 与类群 3 存在部分重叠上看出;类群 4 中心度最大的两个词为影响(0.13)和人类排放二氧化碳(0.1),推测这一部分关键词可能代表是人类二氧化碳排放造成海洋酸化影响机制的研究;类群 5 中的关键词过少,无法直接判断该类群代表的具体内容,但是

该类群与类群 2 存在重叠现象,同样类群 4 与类群 2 也存在重叠现象(图 2a),根据词义可知该类群可能代表结合模型对海洋酸化现象的一些研究。

表 2　对不同时期研究海洋酸化文献中出现频次最高(前 30)的关键词聚类分析结果

Table 2　Results of cluster analysis to the keywords with the highest frequency (the top 30) for the literatures of ocean acidification in different stage

时间 Time	类群 Cluster	关键词(中心度) Keywords(Betweenness centrality)
海洋酸化研究初期(2004—2009 年) Initial stage(2004—2009)	1	气候变化(climate change,0.34);钙化(calcification,0.79);大堡礁(Great Barrier Reef,0);珊瑚礁(coral reef,0);光合作用(photosynthesis,0.04);石珊瑚(scleractinian coral,0.02);海洋生态系统(marine ecosystem,0);珊瑚虫(coral,0.06);二氧化碳分压(CO_2 partial pressure,0.14);碳酸钙饱和度(calcium carbonate saturation,0)
	2	二氧化碳(CO_2,0.32);海水(seawater,0.12);生长(growth,0.03);酸碱平衡(acid base balance,0.05);大西洋(Atlantic ocean,0.01);方解石(calcite,0);pH(potential of hydrogen,0);大气二氧化碳的增加(increased atmospheric CO_2,0)
	3	影响(impact,0.03);大气二氧化碳(atmospheric CO_2,0.13);碳(carbon,0.1);系统(system,0.02);无机碳(inorganic carbon,0.06);赫氏颗石藻(*emiliania huxleyi*,0.42);钙化率(calcification rate,0)
	4	影响(impact,0.13);人类排放二氧化碳(anthropogenic CO_2,0.1);系统(system,0.01)
	5	模型(model,0.01);周期(cycle,0)
海洋酸化研究中期(2010—2015 年) Midterm stage(2005—2010)	1	气候变化(climate change,0.18);钙化(calcification,0.27);珊瑚礁(coral reef,0.04);影响(impact,0.22);大堡礁(Great Barrier Reef,0);海洋生态系统(marine ecosystem,0);石珊瑚(scleractinian coral,0);碳(carbon,0)
	2	二氧化碳(CO_2,0.34);海水(seawater,0.16);温度(temperature,0);生长(growth,0.01);碳酸(carbonic acid,0);pH(potential of hydrogen, 0);解离(dissociation,0.01)
	3	浮游植物(phytoplankton,0.15);光合作用(photosynthesis,0.15);无机碳(inorganic carbon,0);珊瑚虫(coral,0);赫氏颗石藻(*emiliania huxleyi*,0); CO_2浓度升高(elevated CO_2,0)
	4	酸碱平衡(acid base balance,0.01);海胆(sea urchin,0.01)
	5	大气二氧化碳(atmospheric CO_2,0);人类排放二氧化碳(anthropogenic CO_2,0.11)
	6	碳酸钙(calcium carbonate,0)
	7	模型(model,0)
	8	南大洋(Southern Ocean,0)
	9	生物多样性(biodiversity,0)
	10	系统(system,0)
	11	响应(response,0)
海洋酸化研究近期(2016 年以后) Recent stage(after 2016)	1	生长(growth,0.42);钙化(calcification,0);光合作用(photosynthesis,0.37);二氧化碳浓度升高(elevated CO_2,0);海洋浮游植物(phytoplankton,0.1);无机碳(inorganic carbon,0.2)
	2	二氧化碳(CO_2,0.6);影响(impact,0.1);响应(response,0);生物(organism,0);酸碱平衡(acid base balance,0)
	3	气候变化(climate change,0.87);海洋生态系统(marine ecosystem,0);鱼类(fish,0);温度(temperature,0.47)适应(adaptation,0.1);
	4	珊瑚礁(coral reef,0.29);大堡礁(Great Barrier Reef,0.1);石珊瑚(scleractinian coral,0);群落(community,0)
	5	海水(seawater,0.2);碳酸(carbon acid,0);解离(dissociation,0.1)
	6	大气二氧化碳(atmospheric CO_2,0);
	7	碳(carbon,0)
	8	紫贻贝(*mytilus edul*,0)
	9	碳(carbon,0)
	10	南大洋(Southern Ocean,0)
	11	氧化胁迫(oxidative stress,0)
	12	基因表达(gene expression,0)

对中期类群中的关键词进行分析(表 2),与初期类似,类群 1 围绕着钙化一词,中间中心度最大(0.27),同样也包含着较多的珊瑚礁相关的词汇,表明该类群同样代表海洋酸化对珊瑚礁等生物影响的研究;类群 3 则代表了海洋酸化对海洋浮游生物的影响,相较于初期,赫氏颗石藻的中心度降低,而海洋浮游植物和光合作用的中心度最高(0.15),但是类群 1 与类群 3 存在重叠,此外类群 4 包含了关键词海胆,与类群 1 也有着重叠(图 2 中期),表明这三个类群都是海洋酸化对生物影响研究的体现;类群 2 围绕着二氧化碳一词,中间中心度最大(0.34),结合其它关键词(如海水和碳酸等)可以判断出这个类群与初期类似,为对海洋酸化本身现象的认识,与初期不同的是,该类群同时与类群 1 和类群 3 都具有重叠(图 2 中期),表明这一时期的海洋酸化研究在海洋生物上的倾斜;类群 4 以后的 7 个类群仅包含着 1 个或 2 个关键词,大多无法直接判断具体的研究内容且节点与其它类群不存在联系(图 2 中期),但类群 8 和类群 9 可以分别表明新的热点研究区域(南大洋)和研究方向(海洋酸化与生物多样性)。

对近期类群中的关键词进行分析(表 2),类群 1 中关键词生长的中心度最高(0.42),同时还包含了海洋浮游植物、光合作用等生物方面的词汇,可以看出类群 1 代表的是海洋酸化浮游植物的影响,同时可以看出该类群除了与类群 4 重叠以外,与其它类群均没有发生重叠,表明与初期类似,该研究又重新单独出现为一个重点领域;类群 2 围绕二氧化碳一词,中间中心度最大(0.6),与中期类似,为对海洋酸化本身现象的认识;类群 3 气候变化的中间中心度最高(0.87),同时包含着海洋生态系统和鱼类等词表明,该类群代表了海洋酸化对生物及生态系统的影响,同时研究对象扩展到鱼类;类群 4 除了群落一词以外,均是关于珊瑚礁的词汇,表示着海洋酸化对珊瑚礁等生物影响的研究;类群 5 以后的 7 个类群关键词较少(图 2 后期),但是类群 8 紫贻贝(*mytilus edul*)一词的出现可以表明海洋酸化对该种类影响的研究为目前新的内容。总的来说,虽然近期的类群聚类效果较好,类群较为分开,但是主要的几个类群均含有生物相关的词汇表明海洋酸化对海洋生物的影响研究依旧占据着主流方向,其研究内容与初期类似。

综上所述,总体上,在海洋酸化研究初期,研究内容主要分为两个部分,一是海洋酸化对海洋生物(尤其是珊瑚礁生物及浮游植物)及生态系统的影响;二是对海洋酸化现象的认识;中期,研究内容与初期相似,研究重点往海洋生物上倾斜,同时有新的热点研究区域和研究方向的出现;近期,海洋酸化对海洋生物影响的研究依旧占据着主流方向。

2.3 突变分析结果

对样本文献中的参考文献进行突变检测,共检测到 182 篇文献。其中当前(2018 年 2 月)还处于热点关注状态的文献共有 39 篇(表 3),根据对这些文献的分析,发现可以分成以下 5 个类别:

类别 1:海洋酸化对海洋生物的影响;类别 2:海洋酸化现象及机理;类别 3:海洋酸化对生态系统的影响;类别 4:海洋酸化与生物进化;类别 5:其它,为背景及应用文献,如气候变化现状的研究(Bopp 等和 Stocker 等,表 3)。

表 3 基于突变分析得到的当前海洋酸化研究的热点关注的文献(截至 2018 年 2 月)

Table 3 Hot spot literatures of ocean acidification study at present time (up to February 2018) **based on the burst analysis**

类别 Category	文献 Literature	作者 Author	文献来源 Literature sources	发表年份 Published year	突变强度 Burst strength	突变开始年份 Starting year of burst
1	Meta-analysis reveals complex marine biological responses to the interactive effects of ocean acidification and warming	Harvey 等	Ecology & Evolution	2013	11.80	2014
1	Coral resilience to ocean acidification and global warming through pH up-regulation	Mcculloch 等	Nature Climate Change	2012	8.04	2015
1	Parental environment mediates impacts of increased carbon dioxide on a coral reef fish	Miller 等	Nature Climate Change	2013	10.09	2016
1	Sensitivity of coral calcification to ocean acidification: a meta-analysis	Chan 等	Global Change Biology	2013	11.52	2014

续表

类别 Category	文献 Literature	作者 Author	文献来源 Literature sources	发表年份 Published year	突变强度 Burst strength	突变开始年份 Starting year of burst
1	Climate change and ocean acidification effects on seagrasses and marine macroalgae	Koch 等	Global Change Biology	2013	19.51	2015
1	Impacts of ocean acidification on marine organisms quantifying sensitivities and interaction with warming	Kroeker 等	Global Change Biology	2013	59.69	2015
1	Impact of Ocean Acidification on Energy Metabolism of Oyster, *Crassostrea gigas*—Changes in Metabolic Pathways and Thermal Response	Lannig 等	Marine Drugs	2010	19.38	2015
1	Impacts of ocean acidification on marine shelled molluscs	Gazeau 等	Marine Biology	2013	26.63	2015
1	Sensitivities of extant animal taxa to ocean acidification	Wittmann 等	Nature Climate Change	2013	23.00	2015
1	The Pacific oyster, *Crassostrea gigas*, shows negative correlation to naturally elevated carbon dioxide levels: Implications for near-term ocean acidification effects	Barton 等	Limnology and Oceanography	2012	7.90	2015
1	Food availability outweighs ocean acidification effects in juvenile *Mytilus edulis*: laboratory and field experiments	Thomsen 等	Global Change Biology	2013	16.81	2014
1	Physiological impacts of elevated carbon dioxide and ocean acidification on fish	Heuer 等	American Journal of Physiology-Regulatory, Integrative and Comparative Physiology	2014	22.48	2016
1	Experimental ocean acidification alters the allocation of metabolic energy	Pan 等	Proceedings of the National Academy of Sciences	2015	18.72	2016
1	Predicting the Response of Molluscs to the Impact of Ocean Acidification	Parker 等	Biology	2013	18.06	2016
1	Impaired learning of predators and lower prey survival under elevated CO_2: a consequence of neurotransmitter interference	Chivers 等	Global Change Biology	2014	13.21	2016
1	Elevated level of carbon dioxide affects metabolism and shell formation in oysters Crassostrea virginica	Beniash 等	Marine Ecology Progress Series	2010	13.15	2014
1	Multistressor Impacts of Warming and Acidification of the Ocean on Marine Invertebrates' Life Histories	Byrne 等	Integrative and Comparative Biology	2013	12.56	2016
1	Saturation-state sensitivity of marine bivalve larvae to ocean acidification	Waldbusser 等	Nature Climate Change	2015	17.05	2016
1	*Limacina helicina* shell dissolution as an indicator of declining habitat suitability owing to ocean acidification in the California Current Ecosystem	Bednaršek 等	The Royal Society	2014	14.97	2016
1	Ocean Acidification in the Coastal Zone from an Organism's Perspective: Multiple System Parameters, Frequency Domains, and Habitats	Waldbusser 等	Nature Climate Change	2014	10.80	2016
1	Near-future carbon dioxide levels alter fish behaviour by interfering with neurotransmitter function	Nilsson 等	Nature Climate Change	2012	10.95	2016
1,3	Ocean Acidification and Coral Reefs: Effects on Breakdown, Dissolution, and Net Ecosystem Calcification	Andersson 等	Annual Review of Marine Science	2013	14.65	2015
1,2,3	Contrasting futures for ocean and society from different anthropogenic CO2 emissions scenarios	Gazeau 等	Marine Biology	2015	24.99	2015
2	Rapid Progression of Ocean Acidification in the California Current System	Gruber 等	Science	2012	2.98	2014
2	Is Ocean Acidification an Open-Ocean Syndrome? Understanding Anthropogenic Impacts on Seawater pH	Duarte 等	Estuaries & Coasts	2013	18.34	2014

续表

类别 Category	文献 Literature	作者 Author	文献来源 Literature sources	发表年份 Published year	突变强度 Burst strength	突变开始年份 Starting year of burst
2	High-Frequency Dynamics of Ocean pH: A Multi-Ecosystem Comparison	Hofmann 等	Plos One	2011	3.05	2015
2	Future ocean acidification will be amplified by hypoxia in coastal habitats	Melzner 等	Marine Biology	2013	17.80	2014
2	Acidification of subsurface coastal waters enhanced by eutrophication	Cai 等	Nature Geoscience	2011	13.54	2015
2	Coastal ocean acidification: The other eutrophication problem	Wallace 等	Estuarine, Coastal and Shelf Science	2014	18.06	2016
*3	*Ocean acidification through the lens of ecological theory	*Gaylord 等	*Ecology	*2015	*19.39	*2016
3	Climate Change Impacts on Marine Ecosystems	Doney 等	Annual Review of Marine Science	2012	10.20	2016
3	The Impact of Climate Change on the World's Marine Ecosystems	Hoegh-Guldberg 等	Science	2010	11.58	2016
3,5	Multiple stressors of ocean ecosystems in the 21st century: projections with CMIP5 models	Bopp 等	Biogeosciences	2013	18.06	2015
4	Evolution in an acidifying ocean	Sunday 等	Trends in Ecology & Evolution	2014	18.72	2015
4	Transgenerational effects alleviate severe fecundity loss during ocean acidification in a ubiquitous planktonic copepod	Thor 等	Global Change Biology	2015	8.30	2016
4	Predicting evolutionary responses to climate change in the sea	Munday 等	Ecology letters	2013	7.89	2016
*5	*The universal ratio of boron to chlorinity for the North Pacific and North Atlantic oceans	*Lee 等	*Geochimica Cosmochimica Acta	*2010	*13.6478	*2016
5	Carbon and Other Biogeochemical Cycles-IPCC	Ciais 等	climate change 2013: the physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.	2013	18.27	2016
5	Climate change 2013: the physical science basis: Working Group I contribution to the Fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change	Stocker 等	Intergovernmental Panel on Climate Change	2013	21.33	2015

3 讨论与分析

3.1 文献计量分析效果的评价

相对于文献综述,文献计量分析方法可以避免分析研究现状和趋势时对文献选择的主观性,利用文献本身的内在联系客观地描述问题[21]。如本研究中,利用描述统计对研究海洋酸化的文献增长及期刊分布规律进行分析,得到了这 10 年来海洋酸化研究的基本情况:2004—2017 年,涉及海洋酸化的研究文献数量呈现激增的态势(图 1),研究学科交叉明显,海洋酸化对珊瑚礁及海洋浮游植物的影响是这十年来的重点研究领域(表 2)。但是对基于关键词的知识图谱进行聚类时,虽然能够看出不同时期研究的热点方向,研究中期的聚类效果并不好(图 2),这一方面是研究本身的现状决定的,另一方面,该方法的不确定性来源于高频关键词数量的选择[13],高频词数量过少,可能不能涵盖分析的所有内容,数量过多则会导致最终聚类类群过多。因此研究后续加入突变分析进行补充,突变分析使用到的被引次数排名前 10%的参考文献实际最低的引用次数为 2,基本涵盖了学者们的关注内容,而得到的目前还处于热点关注文献中(表 3),共有 26 篇(类别 1 和类别

4)涉及到生物方向,这也侧面佐证了海洋酸化对海洋生物影响的研究占据着研究的主流方向的结果。此外通过阅读突变分析得到的热点关注文献内容,还可以对研究前沿方向有着清晰的判断。

3.2　海洋酸化的前沿问题

根据对表 3 文献的分析,研究认为当前海洋酸化的研究可以分为海洋学、生物学和生态系统 3 个层面(图 3)。具体来说,存在以下 5 个前沿方向:

3.2.1　在探究海洋酸化与生物的关系之时需结合多因子讨论

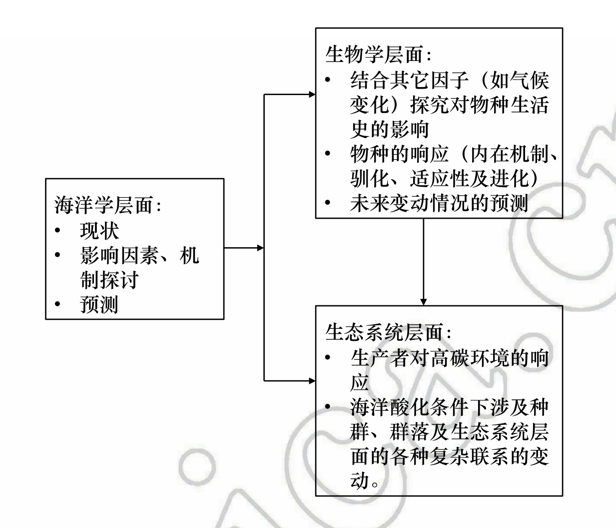


图 3　当前海洋酸化研究内容总结

Fig.3　Summary of present studies for the ocean acidification

在涉及海洋酸化对生物影响研究的文章中,一些研究以海洋酸化作为单一因子,分析其对生物的不利影响,例如 Beniash 等[22]发现,东牡蛎(*Crassostrea virginica*)的幼体在高酸性海水的条件下,其死亡率会增加,同时酸性海水还会降低东牡蛎壳的硬度及韧性。然而也有研究者发现,将海洋酸化结合其它因子共同探究其对生物的影响后,有可能产生其它不同的结果,这种结果可能是更加不利的,也有可能其它因子会缓和海洋酸化带来的不利影响:例如 Byrne 等[23]通过对海洋酸化和海水变暖海洋无脊椎生物影响的文献进行综述分析发现,一些物种会受到来自海洋酸化和海水变暖两方面的负影响,这种影响不仅可以是累加的(additive,如巴拿马滨珊瑚 *Porites panamensis*)也可以是协调的(synergistic,即两种因素同时还存在交互产生额外负影响,如柔枝轴孔珊瑚 *Acropora tenuis*);但是对于一些种类,两种因素的会相互抵消(antagonistic):如白棘三列海胆(*Tripneustes gratilla*)在海水温度增加 3℃ 的条件下会减少海洋酸化对其骨质结构形成的负影响。Mcculloch 等[24]也曾发现,虽然萼柱珊瑚(*Stylophora pistillata*)和滨珊瑚属(*Porites* spp.)种类的钙化情况在海洋酸化条件下会恶化,但是由于其体内与温度相关的 pH 上调(up-regulation)机制的存在,在结合全球变暖因素后,其钙化情况甚至可能会提高。还有研究表明[25],海洋酸化对海洋生物的影响会随着种类生活史阶段的不同而不同:一般成熟的个体或大型种类对抗海洋酸化的能力比幼年个体或小型种类强。以上例子表明,结合单一一个因子对问题的探究有可能造成认识的偏差,若要正确认识海洋酸化对生物的影响,需考虑物种生活史及其它环境因子的共同作用。

3.2.2　探索生物在海洋酸化下的内在应对机制

温度[24]、食物[26]等其它条件可能会中和海洋酸化对一些种类的不利影响,例如前文叙述的一些珊瑚虫体内的 pH 上调机制使得物种对酸化条件的适应。同时,不同种类对海洋酸化本身的响应也存在其特异性,有些种类的生长状况可能会得益于海洋酸化的条件,以 Koch 等[27]对藻类的分析为例,大多数海草和非钙化大型藻类(85%以上)的体内存在碳酸酐酶(Carbonic Anhydrase)能够将海水中的海洋酸化的产物——HCO_3^-转化为二氧化碳,同时它们是 C_3 光合植物,在酶的作用下其光合作用随着二氧化碳浓度的升高而增强。然而,Koch 等[27]也指出,对于一些钙化大型藻类,它们虽能得益于海水二氧化碳的升高而促进光合作用,但是酸性的条件又会阻止其钙化妨碍他们的生长。那么这两者的综合效果如何? 解决这个问题首先就需要探究钙化大型藻类体内的钙化机制和光合作用过程。由此可见,为了客观判断海洋酸化对生物的影响,还需要从个体的内部过程入手(如碳循环过程,酸碱平衡等),同时结合其它因素(如温度情况),具体分析生物对海洋酸化条件下的响应机制。

此外,生物对于海洋酸化条件存在着驯化:例如 Dupont 等[28]等在对一种桡足类(*Pseudocalanus acuspes*)的培养中发现,与生活在低二氧化碳的条件的亲体相比,高二氧化碳的条件下会造成其繁殖力的下降,但是若将生活在低二氧化碳条件的亲体暴露于高二氧化碳的环境,其繁殖力下降程度要比已经生活在高二氧化碳的

条件一个世代的亲体高 28%。这表明生物对于海洋酸化条件存在着驯化机制。此外,在海洋酸化的条件下由于表观遗传多样性及基因多样性,物种同样存在着适应及进化的可能性[29]。例如对在低 pH 条件下培养了七天的紫色球海胆(*Strongylocentrotus purpuratus*)幼体检测发现,涉及骨架构成及 pH 调节的等位基因发生改变,这种改变能够使得该物种更适应海洋酸化的环境[30]。然而,一般的探究海洋酸化与生物关系的实验常常是短期、单世代的[31],海洋酸化却是一个长时间的气候变化,物种存在驯化和进化的可能性很高。因此,在探究生物在海洋酸化下的应对机制时,还需要关注物种自身由于驯化和进化产生的适应性,对于这方面的研究,一方面我们应该认识到,基于保证海洋生态系统可持续发展的目的,进化并不是拯救海洋生物的万灵药,而是要将这一部分的不确定性应用到后续的生态系统变化的预测和管理中[29];另一方面,虽然我们不能研究所有生物的进化,但是可以有所选择:首先应该结合生态系统的结构和功能选取其中的关键种,同时,优先研究进化可能性较高的动物,比如世代转化快、种群有着庞大物种(基因库)的小型浮游植物[31]。

3.2.3 海洋酸化影响下的生物响应的综合评估及预测

通过前两点的描述,可以看到生物在海洋酸化条件下的丰富的响应情况,那么在这种包含有利和不利响应的证据下,整体或者未来的生物的状况如何?例如,Chan 等[32]就发现,在现在海洋酸化的条件下,不同的研究对珊瑚虫的钙化率变化得到的结果不同:每下降一个单位的方解石饱和度钙化率变化有正有负,为-66%—25%,因此他们利用 Meta 分析的方法综合分析了 25 组现有的实验结果,认为对于整个海洋珊瑚虫群落,当前这个数值应为-15%,同时预测在 2100 年总体珊瑚礁的钙化率会下降 22%。Wittmann 等[33]则预测在 2100 年(预测到的大气二氧化碳分压的摩尔分数为 0.0936%)时,鱼类、甲壳类,珊瑚虫、棘皮动物和软体动物都会受到海洋酸化带来的负的影响,其中后面三个种类受到的影响比前面两个大。Chan 等[32]和 Wittmann 等[33]的研究都用了 Meta 分析的方法,相同的方法还可见 Harvey 等[25]。但是,Meta 分析存在着其分析固有的缺陷,Harvey 等[25]就指出,它是对研究者所选研究结果的量化总结, Meta 分析的极大依赖于研究者对研究结果的主观选择,将物种合成一大类同时还会掩盖住物种的特异性。今后的分析中,建议在充分了解物种对海洋酸化响应、物种的中间关系的基础上,结合物理海洋学和生态学的方法,采用生态系统动力学模型进行综合研究。

3.2.4 探索海洋酸化对海洋生态系统的影响

生物在海洋酸化下的丰富的响应同样会带来物种关系的改变,最终可能改变生态系统的结构与功能。虽然突变分析探测出相关方面的文章较少,只有 5 篇,且大多都为综述类理论研究文章(表 3),但是这可以表明学者已经开始将视野逐渐转到生态系统这一整个海洋大系统上。这里仅分析 Gaylord 等提供的相关理论研究结果以具体描述目前的研究内容[34]:基于海洋生态系统的角度海洋酸化的研究存在以下 3 个基本观点:观点一:海水二氧化碳的增加为初级生产者提供了生产力;观点二:海洋酸化会给许多消费者生存带来能量消耗;观点三:生物间的相互联系的认识是研究海洋酸化对海洋生态系统影响的关键所在。具体来说,观点一有可能会是正影响,因为海洋酸化对海洋生态系统带来了更多的碳源;观点二表明了各种消费者在海洋酸化条件下维持生存的额外消耗,这属于生物学层面的研究内容;而观点三中的相互联系包含了很多方面的内容:海洋酸化可能会对消费者的初级生产力利用产生的负影响、对种群内部以及种群间过程和联系(竞争、捕食和互助关系)的影响、对群落结构的影响、种群结构和群落结构对海洋酸化的驯化和适应及生态系统的物种多样性变化。由此可见,探索海洋酸化对海洋生态系统的影响研究需要在生物学层面认识的基础上(生物个体的变化),重点研究以下两点:第一:生产者对高碳环境的响应;第二:海洋酸化条件下涉及种群、群落及生态系统层面的各种复杂联系的变化。

3.2.5 对海洋酸化概念的挑战——海洋酸化形成原因的探索

Caldeira 等[1]的海洋酸化概念将海洋酸化形成原因完全归结于人类排放二氧化碳持续增加。在该概念提出的后续几年,不少观测资料确实证明了这一点:其中最为著名的证据是在北太平洋的莫纳罗(Mauna Loa)站点观测大气二氧化碳浓度与其临近海域阿罗哈(Aloha)站点观测海水二氧化碳浓度两条曲线的年间变

动几乎完全一致的现象[35]。这种人类排放二氧化碳持续增加导致了海洋酸化的观点几乎被大多研究者所接受,然而,最近的研究表明,这一观点实际上是偏颇的。Hofmann 等[36]比较了不同海域 pH 的变动,发现相比于开阔的大洋区域,近岸的 pH 变动非常剧烈,他们指出,这种剧烈的变动其实源自于近岸复杂的物理、化学和生物过程。Duarte 等[37]对这些过程进行了归纳(表 4),可以看出,海水对人类排放二氧化碳的吸收仅为这些过程的其中一个因素。那么,其它因素是否也能引起海水的 pH 降低? 对于这个问题目前已有研究:Cai 等[38]对墨西哥湾的海洋酸化情况进行研究,发现,人类排放的二氧化碳使得海水 pH 降低了 0.27,该值低于由富营养化导致的 pH 降低数值(为 0.34)。Wallace 等[39]对北美州大西洋沿岸的研究也有相似的结果。Duarte 等[37]观察了一些沿岸生态系统海水 pH 的年间变动,发现不同区域的 pH 变动情况不同,有些地方保持平稳波动而有些地方甚至出现了上升:例如美国切萨皮克湾(Chesapeake Bay)的海水由于同时存在着高 pH 和低 pH 河流水的汇入,不同河流水汇入的多少的年间差异导致其海水 pH 常年保持着波动状态;而美国坦帕湾(Tampa Bay)的海水 pH 除了在 1980-1985 年有着迅速的下降以外,在 1985 年以后都保持着上升的趋势,1980 年以后几年的下降来源于当时海湾附近人口的快速增长导致的营养物质的无节制排放,而在这之后由于实行了有效的管理,海草及水质的改善使得坦帕湾海水的 pH 逐年升高。此外,研究发现,沿岸的 pH 变化还很大的受到了季节性因素的影响:沿岸 pH 不管在大时间尺度还是小的季节尺度其 pH 的变动幅度(数十年变化 0.5 左右,季节性变化大于 0.1)都要远大于相对稳定的开阔的大洋(数十年来总体减少了 0.1,季节性变化小于 0.05)[35-37]。可见,在沿岸区域,海洋酸化的原因不一定完全由人类排放二氧化碳增加导致的,其它因素也有可能是海洋酸化的主要原因。

表 4　海水 pH 变动因素总结[37]

Table 4　Summary of processes driving changes in ocean pH

驱动因素 Driver	自然因素 Natural disturbance	与人类相关的因素 Anthropogenic disturbance
海气交换 Air-sea exchange	海气二氧化碳的交换	海洋吸收人类排放的二氧化碳
水文变动 Watershed processes	天气 火山活动 生态系统变化 气候变动 混合动力过程及海水滞留时间	含酸或含碱污水的排放 采矿 酸性土壤的侵入 填海 农业 熔炼工业 水文扰动 人类因素导致的气候变化
生态系统变化 Ecosystem processes	物种新陈代谢的类型及变动	富营养化 栖息地缺失 人类因素导致的气候变化

综上所述,在开阔的大洋,人类排放二氧化碳增加确实是导致的海洋酸化的主要原因;而在沿岸区域,我们还需要了解除这一因素以外,海洋酸化形成的其它原因。对海洋酸化概念的挑战并不是要否定海洋酸化这一现象,毕竟人类二氧化碳排放的增加是不争的事实。要探究的是,在不同的沿岸海域,哪一种因素才是海洋酸化的主要原因,这样人们在应对时,除了采取减少二氧化碳排放这一主要措施以外,还能够因地制宜,针对具体的原因,采取其它更加有效的方法进行治理达到保护海洋生态系统稳定性的最终目的。

3.3　展望

本研究利用文献计量分析的方法对目前海洋酸化的研究进行了概括。可以发现,海洋酸化所涉及的研究通常需要多个学科的支持,例如在研究富营养化产生的海水酸化时除了需要海洋学科的帮助得到海洋水文的具体数据,也需要生物和生态学知识以对富营养化有着较深的认识,因此今后海洋酸化的研究建议应开展多学科的共同合作。除外,海洋酸化研究涉及学科面广这个特点也可能造成本研究的不足,研究的样本是 ISI

Web of Science 期刊引文数据库中的 Web of Science 核心合集以海洋酸化主题词的文献,分析结果有可能会过于笼统,无法阐述某一问题或方向研究的具体变动趋势,今后的研究可以将问题细化在海洋酸化文献检索中增加主题词进行具体分析。

参考文献(References):

[1] Caldeira K, Wickett M E. Oceanography: anthropogenic carbon and ocean pH. Nature, 2003, 425(6956): 365-365.

[2] Gattuso J P, Hansson L. Ocean Acidification. Oxford: Oxford University Press, 2011.

[3] 唐启升, 陈镇东, 余克服, 戴民汉, 赵美训, 柯才焕, 黄天福, 柴扉, 韦刚健, 周力平, 陈立奇, 宋佳坤, Barry J, 吴亚平, 高坤山. 海洋酸化及其与海洋生物及生态系统的关系. 科学通报, 2013, 58(14): 1307-1314.

[4] 张成龙, 黄晖, 黄良民, 刘胜. 海洋酸化对珊瑚礁生态系统的影响研究进展. 生态学报, 2012, 32(5): 1606-1615.

[5] 王琪. 撰写文献综述的意义、步骤与常见问题. 学位与研究生教育, 2010,(11): 49-52.

[6] Lemasson A J, Fletcher S, Hall-Spencer J M, Knights A M. Linking the biological impacts of ocean acidification on oysters to changes in ecosystem services: a review. Journal of Experimental Marine Biology and Ecology, 2017, 492: 49-62.

[7] Segman R F, Dubinsky Z, Iluz D. Impacts of ocean acidification on calcifying macroalgae: *Padina* sp. as a test case-a review. Israel Journal of Plant Sciences, 2016, doi: 10.1080/07929978.2016.1237491.

[8] 曹树金, 吴育冰, 韦景竹, 马翠嫦. 知识图谱研究的脉络、流派与趋势——基于 SSCI 与 CSSCI 期刊论文的计量与可视化. 中国图书馆学报, 2015, 41(5): 16-34.

[9] 刘峤, 李杨, 段宏, 刘瑶, 秦志光. 知识图谱构建技术综述. 计算机研究与发展, 2016, 53(3): 582-600.

[10] 钟伟金, 李佳. 共词分析法研究(一)——共词分析的过程与方式. 情报杂志, 2008, 27(5): 70-72.

[11] Kamada T, Kawai S. An algorithm for drawing general undirected graphs. Information Processing Letters, 1989, 31(1): 7-15.

[12] Chen C M, Morris S. Visualizing evolving networks: minimum spanning trees versus pathfinder networks//Proceedings of 2003 IEEE Symposium on Information Visualization. Seattle, WA, USA: IEEE, 2003: 67-74.

[13] 钟伟金, 李佳, 杨兴菊. 共词分析法研究(三)——共词聚类分析法的原理与特点. 情报杂志, 2008, 27(7): 118-120.

[14] Chen C M, Ibekwe-SanJuan F, Hou J H. The structure and dynamics of cocitation clusters: a multiple-perspective cocitation analysis. Journal of the American Society for Information Science and Technology, 2010, 61(7): 1386-1409.

[15] 刘健. 国外元数据研究前沿与热点可视化探讨[D]. 南京: 南京大学, 2013.

[16] 赵一洁. 基于 CiteSpace 的建筑业职业安全健康研究现状与趋势[D]. 重庆: 重庆大学, 2014.

[17] 侯剑华. 工商管理学科演进与前沿热点的可视化分析[D]. 大连: 大连理工大学, 2009.

[18] Kleinberg J. Bursty and hierarchical structure in streams. Data Mining and Knowledge Discovery, 2003, 7(4): 373-397.

[19] 庞杰. 知识流动理论框架下的科学前沿与技术前沿研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2011.

[20] Chen C M. CiteSpace II: Detecting and visualizing emerging trends and transient patterns in scientific literature. Journal of the American Society for Information Science and Technology, 2006, 57(3): 359-377.

[21] 邱均平, 王曰芬. 文献计量内容分析法. 北京: 国家图书馆出版社, 2008: 1-5

[22] Beniash E, Ivanina A, Lieb N S, Kurochkin I, Sokolova I M. Elevated level of carbon dioxide affects metabolism and shell formation in oysters *Crassostrea virginica*. Marine Ecology Progress Series, 2010, 419: 95-108.

[23] Byrne M, Przeslawski R. Multistressor impacts of warming and acidification of the ocean on marine invertebrates' life histories. Integrative and Comparative Biology, 2013, 53(4): 582-596.

[24] McCulloch M, Falter J, Trotter J, Montagna P. Coral resilience to ocean acidification and global warming through pH up-regulation. Nature Climate Change, 2012, 2(8): 623-627.

[25] Harvey B P, Gwynn-Jones D, Moore P J. Meta-analysis reveals complex marine biological responses to the interactive effects of ocean acidification and warming. Ecology and Evolution, 2013, 3(4): 1016-1030.

[26] Thomsen J, Casties I, Pansch C, Körtzinger A, Melzner F. Food availability outweighs ocean acidification effects in juvenile *Mytilus edulis*: laboratory and field experiments. Global Change Biology, 2013, 19(4): 1017-1027.

[27] Koch M, Bowes G, Ross C, Zhang X H. Climate change and ocean acidification effects on seagrasses and marine macroalgae. Global Change Biology, 2013, 19(1): 103-132.

[28] Thor P, Dupont S. Transgenerational effects alleviate severe fecundity loss during ocean acidification in a ubiquitous planktonic copepod. Global Change Biology, 2015, 21(6): 2261-2271.

[29] Parker L M, Ross P M, O'Connor W A, Pörtner H O, Scanes E, Wright J M. Predicting the response of molluscs to the impact of ocean

acidification. Biology, 2013, 2(2): 651-692.

[30] Pespeni M H, Sanford E, Gaylord B, Hill T M, Hosfelt J D, Jaris H K, LaVigne M, Lenz E A, Russell A D, Young M K, Palumbi S R. Evolutionary change during experimental ocean acidification. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2013, 110(17): 6937-6942.

[31] Sunday J M, Calosi P, Dupont S, Munday P L, Stillman J H, Reusch T B H. Evolution in an acidifying ocean. Trends in Ecology & Evolution, 2014, 29(2): 117-125.

[32] Chan N C S, Connolly S R. Sensitivity of coral calcification to ocean acidification: a meta-analysis. Global Change Biology, 2013, 19(1): 282-290.

[33] Wittmann A C, Pörtner H O. Sensitivities of extant animal taxa to ocean acidification. Nature Climate Change, 2013, 3(11): 995-1001.

[34] Gaylord B, Kroeker K J, Sunday J M, Anderson K M, Barry J P, Brown N E, Connell S D, Dupont S, Fabricius K E, Hall-Spencer J M, Klinger T, Milazzo M, Munday P L, Russell B D, Sanford E, Schreiber S J, Thiyagarajan V, Vaughan M L H, Widdicombe S, Harley C D G. Ocean acidification through the lens of ecological theory. Ecology, 2015, 96(1): 3-15.

[35] Feely R A, Doney S C, Cooley S R. Ocean acidification: present conditions and future changes in a High-CO_2 world. Oceanography, 2009, 22(4): 36-47.

[36] Hofmann G E, Smith J E, Johnson K S, Send U, Levin L A, Micheli F, Paytan F, Price N N, Peterson B, Takeshita Y, Matson P G, Crook E D, Kroeker K J, Gambi M C, Rivest E B, Frieder C A, Yu P C, Martz T D. High-frequency dynamics of ocean pH: a multi-ecosystem comparison. PLoS One, 2011, 6(12): e28983.

[37] Duarte C M, Hendriks I E, Moore T S, Olsen Y S, Steckbauer A, Ramajo L, Carstensen J, Trotter J A, McCulloch M. Is ocean acidification an open-ocean syndrome? Understanding anthropogenic impacts on seawater pH. Estuaries and Coasts, 2013, 36(2): 221-236.

[38] Cai W J, Hu X P, Huang W J, Murrell M C, Lehrter J C, Lohrenz S E, Chou W C, Zhai W D, Hollibaugh J T, Wang Y C, Zhao P S, Guo X H, Gundersen K, Dai M H, Gong G C. Acidification of subsurface coastal waters enhanced by eutrophication. Nature Geoscience, 2011, 4(11): 766-770.

[39] Wallace R B, Baumann H, Grear J S, Aller R C, Gobler C J. Coastal ocean acidification: the other eutrophication problem. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2014, 148: 1-13.